

Сведения о выполненных работах в 2019 году
по проекту **«Комплексные экспериментально-теоретические исследования
высокоскоростного входа в воду и движения в ней группы суперкавитирующих
ударников при совместном пушечном старте»**,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 19-19-00233

Руководитель д-р физ.-мат. наук Ищенко Александр Николаевич

Для решения основной задачи, поставленной в проекте, а именно - проведение исследований высокоскоростного входа в воду и движения в ней группы суперкавитирующих ударников при совместном пушечном старте с начальной скоростью порядка 1500 м/с, обеспечение их устойчивого движения на различных глубинах и дистанциях и эффективного воздействия на подводные преграды, в период 2019 года работы осуществлялись по следующим направлениям, согласно Плана работ научного исследования.

Проведена модернизация лабораторного гидробаллистического стенда. Гидробаллистический стенд состоит из пороховой баллистической установки калибром 30 мм, вакуумируемой части трассы, аэродинамической и гидродинамической частей и измерительно-регистрирующего комплекса. Вакуумная часть трассы используется для снижения влияния ударной волны от выстрела, аэродинамическая часть трассы используется для отделения ведущих устройств подкалиберных метаемых ударников. Гидродинамическая часть трассы, отделенная от аэродинамической специальной мембраной, представляет собой герметично закрытую трассу с иллюминаторами для наблюдения за состоянием и положением ударников на различных участках трассы. Гидробаллистическая трасса имеет протяженность водного участка 10.5 м и заканчивается мишенным блоком. Вся трасса оснащена иллюминаторами для установки фото- и видеорегистрирующей аппаратуры. В трассе разработан узел, обеспечивающий визуализацию отделения ведущих устройств от ударников на воздушном участке трассы, для этого на нем предусмотрены четыре иллюминатора располагаемые в одном сечении трассы с возможностью съемки сверху, снизу или сбоку. Основная информация о скоростях и движении исследуемых ударников получается с помощью высокоскоростной фото- и видеорегистрирующей аппаратуры, системы синхронизации для запуска импульсных источников освещения, на различных участках трассы: вакуум, воздух, вода. Для исследования быстропротекающих процессов в качестве средств видеорегистрации на гидробаллистической трассе используются две высокоскоростные видеокамеры и один высокоскоростной фоторегистратор. Вследствие необходимости производить видеорегистрацию процессов с приемлемой детализацией при характерной скорости движения тел порядка 1000...1500 м/с, требуется обеспечение экспозиции кадра не более 1 мкс. Для этого разработана система синхронизации, обеспечивающая запуск осветительных систем и средств видеорегистрации для наблюдения за движущимися ударниками на разных участках трассы (вакуум, воздух, вода). Разработаны метаемые сборки с одиночным ударником из стали, двумя ударниками из стали и двумя

ударниками из сплава ВНЖ. Каждый ударник также представляет собой тонкий усеченный конус с дисковым кавитатором. На примере метаемой сборки с одиночным стальным ударником проведены пуско-наладочные работы по запуску синхронизирующей аппаратуры для регистрации движения ударников в воде. Приобретенное за счет средств проекта оборудование применено при модернизации гидробаллистического стенда.

Разработаны математические модели и численные методики расчета внутрибаллистических процессов при выстреле для прогнозирования заданной дульной скорости при совместном пушечном старте группы суперкавитирующих ударников. Математические модели базируются на основных допущениях механики многофазных сред и предусматривают наличие в метательном заряде произвольного количества фракций частиц. В качестве численной методики расчета используется модифицированный метод С. К. Годунова, позволивший повысить порядок аппроксимации по пространственной координате до второго и второй порядок по времени. Интенсивное ускорение метаемой сборки с группой ударников может привести к деформации ведущего устройства или ударника, а впоследствии к смещению заданного положения ударников относительно друг друга и появлению непрогнозируемых углов атаки при движении в воде. Использование разработанной математической модели, позволяет выбирать плавный «щадящий» режим разгона метаемой сборки за счет подбора составных частей метательного заряда. Сделан выбор типов высокоэнергетических порохов и оценка достижимого диапазона скоростей для метания разработанных компоновок с использованием 30 мм баллистической установки. На основе разработанной математической модели были проведены комплексные параметрические исследования по определению условий заряжания баллистической установки для достижения требуемых дульных скоростей метаемых сборок, содержащих в себе группу суперкавитирующих элементов. В исследовании проводились внутрибаллистические расчеты с использованием нескольких масс метаемых сборок в диапазоне от 70 до 250 г. Максимально допустимое рабочее давление в камере заряжания для баллистической установки составляет 600 МПа. Для соблюдения безопасности, безотказной баллистического стенда и измерительного оборудования были также рассчитаны зависимости давления в камере баллистической установки от дульной скорости для различных метаемых сборок. В рамках корректировки математической модели была произведена идентификация физического закона газообразования порохового заряда на основе сравнения с экспериментальными данными. После подстановки идентифицированного физического закона горения в программу для решения прямой задачи внутренней баллистики, было получено согласование с экспериментальными данными по уровню максимального давления в камере заряжания и дульной скорости с относительной погрешностью не более 1 ... 3 %. Достигнуто практически полное совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей давления от времени в камере заряжания.

Проведено обобщение математической модели деформирования и разрушения композиционных материалов на исследование высокоскоростного взаимодействия сред со сложной структурой и ударно-волновых процессов, происходящих при входе в воду и взаимодействии в воде двух близ расположенных суперкавитирующих

ударников при скорости движения порядка 1500 м/с. Математическое моделирование проводится в единой методологии механики сплошной среды: для описания твердого тела предлагается упругопластическая модель с учетом разрушения, для описания воды – гидродинамическая модель среды. Модель динамического разрушения композиционных материалов распространена на хрупкие материалы с учетом двух подходов. В первом подходе разрушение рассматривается как процесс роста и слияния микродефектов (трещин, пор и т.д.) под действием образующихся в процессе нагружения напряжений, второй подход – феноменологический, в котором критерии прочности выражаются через инвариантные связи между критическими значениями напряжений и деформаций. Разработаны численные методики расчета входа в воду группы суперкавитирующих ударников в двумерной постановке на базе метода крупных частиц и полной трехмерной постановке на базе метода конечных элементов. Для реализации численных методик используются авторские программы для ЭВМ. Проведённая верификация математических моделей и численных методик при решении задач водной баллистики показала адекватность расчетов рассматриваемым физическим процессам, происходящим при входе в воду одного и взаимодействии в воде двух близко расположенных суперкавитирующих ударников при скорости порядка 1000 м/с. Показано, что два ударника при одновременном входе в воду на начальном участке траектории движения незначительно расходятся из-за взаимного влияния, в дальнейшем сохраняют поступательное движение по параллельным траекториям.

Разработана физико-математическая модель и методика расчета параметров подводного движения группы инертных тел в режиме суперкавитации с возможностью учета их взаимовлияния. Выбрана система определяющих обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение суперкавитирующих ударников в воде с учетом внешних воздействий при групповом метании. При этом учитывается переменность параметров жидкой среды (температуры, плотности), а также давление насыщенного пара в каверне в зависимости от глубины погружения носителя и солености жидкости. Для численного интегрирования дифференциальных уравнений использовалась явно-неявная модификация метода Эйлера, обеспечивающая второй порядок аппроксимации разностных соотношений. Разработана расчетная программа для реализации численной методики на языке Pascal в инструментальной среде Delphi-7 применительно к операционным системам Windows 7-10. Проведены предварительные тестовые расчеты по определению траектории движения группы суперкавитирующих ударников при наличии возмущающих факторов. При сравнении с известными экспериментальными данными отмечено хорошее качественное и удовлетворительное количественное совпадение (расхождение менее 0.2 %) по форме и параметрам траекторий при учете эффектов взаимовлияния ударников через возмущения среды, где происходит их движение.

В результате выполнения проекта в период 2019 года достигнуты следующие научные результаты по четырем направлениям.

1 Разработана экспериментальная методика исследования высокоскоростного движения группы суперкавитирующих ударников в воде при одновременном старте из

гладкоствольной баллистической установки калибром 30 мм в диапазоне скоростей движения порядка 300...1500 м/с. Разработаны ударники из стали и высокопрочного сплава ВНЖ-95, которые движутся в воде в режиме суперкавитации в исследуемом диапазоне скоростей. Разработаны новые конструктивно-компоновочные схемы метаемых сборок с одним и двумя ударниками для отработки параметров суперкавитирующих ударников при групповом метании в воду. По результатам тестовых испытаний получена информация об устойчивом движении одного и двух ударников, метаемых одновременно, в режиме суперкавитации, а также о процессе формирования суперкаверн и их взаимодействии при групповом движении ударников.

2 На основе разработанной математической модели и численной методики расчета внутрибаллистических процессов при выстреле для прогнозирования заданной дульной скорости при совместном пушечном старте группы суперкавитирующих ударников определены условия заряжания баллистической установки для метания сборок в широком диапазоне их скоростей (от 300 до 1500 м/с) и масс (от 70 до 250 г).

3 На основе математической модели деформирования и разрушения композиционных материалов и численных методик расчета входа в воду группы суперкавитирующих ударников в двумерной и полной пространственной постановках на базе численных методов механики сплошной среды проведены предварительные исследования ударно-волновых процессов, происходящих при входе в воду и взаимодействии в воде двух близ расположенных суперкавитирующих ударников при скорости 1087 м/с. Показано, что два ударника на начальном участке траектории движения незначительно расходятся из-за взаимного влияния, в дальнейшем сохраняют поступательное движение по параллельным траекториям. Показано, что достижение высоких скоростей метания предъявляет высокие требования к прочности суперкавитирующих ударников, и при скоростях порядка 1500 м/с необходимо для их изготовления использовать высокопрочные материалы.

4 На основе разработанной методики проведены параметрические исследования по оценке максимальных отклонений движения ударников от "идеальной" траектории. Получена зависимость отклонения ударников на заданной дальности при их одновременном старте в зависимости от расстояния между осями стартовых направлений, стартовых скоростей и масс ударников. Показан и проанализирован существенно сложный характер взаимовлияния на траектории движения ударников в случае разновременного старта. Полученные результаты позволяют оценить максимальные отклонения ударников на траектории для значимого диапазона межстартовой задержки для конкретных значений расстояния между осями стартовых направлений.

По результатам исследований опубликованы и направлены в печать 8 статей, в том числе, в научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus – 3, из них имеющие квартиль Q1 – 2 статьи.

По достигнутым научным результатам на научных мероприятиях (конференциях, симпозиумах и пр.) сделано 5 докладов, из них 1 - на международной конференции.